

UNTERSUCHUNGEN ZUR THERMODYNAMIK
IM PROXIMALEN UND DISTALEN
SKELETTMUSKEL
IN VIVO

Axel Baumann

1976



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555611_0085

Aus der Neurologischen Klinik der Universität München

Direktor: Prof. Dr. A. Schrader

UNTERSUCHUNGEN ZUR THERMODYNAMIK IM
PROXIMALEN UND DISTALEN SKELETTMUSKEL
IN VIVO

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig Maximilians - Universität zu München

vorgelegt von

Axel Baumann

aus

Hammerau

Jahr

1976

Mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin der

Universität München

Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. F. Láhoda

Mitberichterstatter: Prof. Dr. A. Schrader

Dekan: Prof. Dr. W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 22. 6. 1976



INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung: Allgemeine Betrachtung bereits bekannter Ergebnisse und noch offener Fragen zur Thermodynamik im menschlichen Skelettmuskel.....	5
2. Hauptteil: Experimentelle Untersuchungen myothermalen Erscheinungen in vivo.....	8
2.1 Methodik.....	8
2.1.1 Versuchspersonen und äußere Bedingungen	
2.1.2 Meßtechnik	
2.1.3 Untersuchte Muskeln	
2.1.4 Versuchsablauf	
2.2 Ergebnisse.....	11
2.2.1 Einzelkontraktionen	
2.2.1.1 proximale Muskeln	
2.2.1.2 distale Muskeln	
2.2.1.3 Mischtypen	
2.2.2 Zusammenstellung der Verlaufsformen	
2.2.3 Kontraktionsserien	
2.2.4 Venentemperaturmessung	
2.3 Diskussion.....	25
2.3.1 Kontraktionswärme und Muskeldurchblutung	
2.3.2 Temperaturfelder des menschlichen Körpers	
2.3.3 Muskelkontraktion und Erschlaffung	
2.3.4 Kontraktionsserien	
2.3.5 Erholungsphasen	
2.3.6 Muskeltemperatur - Venentemperatur	
2.3.7 Ausblick	
3. Zusammenfassung.....	33
4. Literaturverzeichnis.....	34

1. EINLEITUNG

Wärmebildung bei Muskeltätigkeit ist eine bekannte Erscheinung. Ihre qualitative Erklärung ist nicht schwer. Die zur Leistung von Arbeit oder zur Erzeugung von Spannung benötigte Energie stammt aus chemischen Umsätzen, die stets von Wärmebildung begleitet sind, weil immer nur ein Teil der freien Energie in Arbeit umgesetzt werden kann; der größte Teil tritt in Form von Wärme auf. Die Analyse des Verlaufs der Wärmebildung im Muskel ist von Bedeutung, da man dadurch wertvolle Einblicke in Richtung und Umfang der ablaufenden chemischen Reaktionen erhält, und so thermische, chemische und mechanische Vorgänge zueinander in Beziehung setzen kann, was letztlich zum Verständnis der Muskelfunktion beiträgt. Natürlich ist es aber nicht möglich, mit thermodynamischen Untersuchungen allein den Mechanismus der die Muskelkontraktion begleitenden Vorgänge aufzuklären.

Bei den von LAHODA F., ISSEL W. und ROSS A. durchgeführten Untersuchungen wurde von der Überlegung ausgegangen, die thermischen Vorgänge im menschlichen Skelettmuskel in vivo während verschiedener Phasen der willkürlichen Kontraktion und denen danach, bei gleichzeitiger Aufzeichnung der Aktionspotentiale zu registrieren, was bis dahin s i m u l t a n noch nicht durchgeführt worden war(12). Diese Untersuchungen wurden erst durch eine eigens für diesen Zweck entwickelte Thermoelektrode möglich. Überraschenderweise zeigte sich, daß bei allen Versuchspersonen während der Muskelkontraktion ein Temperaturabfall zu beobachten war.

Diese Ergebnisse entsprachen nicht den von HILL A. V. beschriebenen Phasen der Wärmebildung während der Kontraktion (8). (Abb.1)

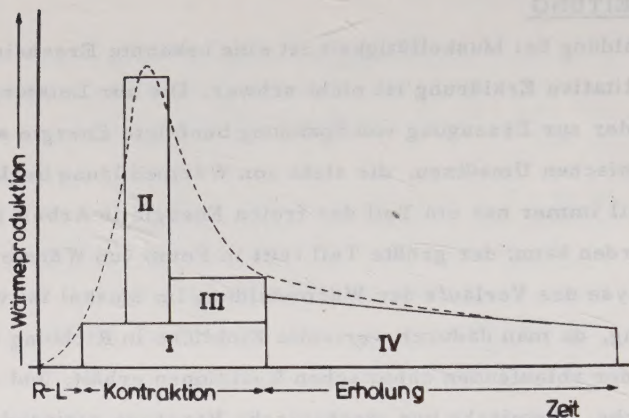


Abb. 1 Wärmeproduktion während und nach der Muskelkontraktion (schematisch). I = Aktivierungswärme und Erhaltungswärme, II = Verkürzungswärme, III = Erschlaffungswärme, IV = Erholungswärme, R = Reizmoment, L = Latenzzeit.

HILLs Messungen wurden an isolierten, nicht durchbluteten Froschmuskeln durchgeführt. Bevorzugt wurden dünne Muskeln ($\varnothing 1,0 - 0,35 \text{ mm}$) mit parallel verlaufenden Fasern ($45 - 32 \text{ mm}$) verwendet, deren Querschnitt über ihre ganze Länge hin annähernd konstant bleibt. Temperaturveränderungen wurden an der Oberfläche der elektrisch gereizten Muskeln während Einzelzuckungen registriert. Die Unterschiede in der technischen Ausstattung der Versuchsanordnungen von HILL einerseits und LAHODA andererseits reichten aber als mögliche Ursache für die unterschiedlichen Resultate nicht aus. Deshalb wurde von LAHODA die aus Arbeiten von BARCROFT H. & MILLEN J. bekannte Kompression der Muskelgefäße während der Kontraktion als wahrscheinliche Erklärung des beobachteten Phänomens diskutiert (13) (2).

Um zusätzliche Einblicke in die thermodynamischen Veränderungen des Skelettmuskels während der Kontraktion zu erhalten, schien es angebracht, die den Temperaturverlauf bedingenden Faktoren näher abzuklären.

Die gewonnenen Ergebnisse sind als ergänzende Orientierungswerte zu den an der hiesigen Klinik bereits durchgeführten Untersuchungen zu sehen. Gemeinsames Ziel ist es über Temperaturmessungen Rückschlüsse auf den funktionellen Grad der Durchblutung und den Sauerstoffverbrauch des Muskels ziehen zu können. Qualitative und quantitative Aussagen über den Einfluß von passagerer, kontraktionsbedingter Minderdurchblutung und reaktiver Hyperämie sind in der Arbeits- und Sportmedizin als auch bei pathologischen Veränderungen des Muskels bzw. seiner Gefäßversorgung in der Neurologie von praktischer, klinischer Bedeutung.

2. HAUPTTEIL

2. 1. Methodik

2. 1. 1. Versuchspersonen und äußere Bedingungen

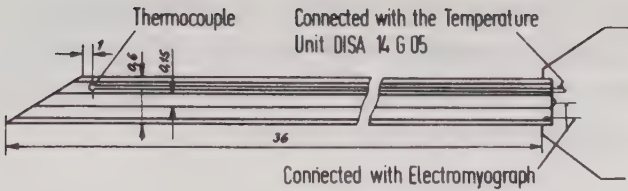
Die Temperaturmessungen vor, während und nach der Willkürkontraktion proximaler und distaler Muskeln wurden an 42 freiwilligen, vornehmlich jüngeren, gesunden Versuchspersonen durchgeführt, wovon 31 männlichen und 11 weiblichen Geschlechts waren. Ihr Alter lag zwischen 18 und 54 Jahren, der Durchschnitt bei 29 Jahren. Bei der erhobenen Kurzanamnese wurde besonderer Wert darauf gelegt, daß weder akute noch chronische, periphere Durchblutungsstörungen vorlagen.

2. 1. 2. Meßtechnik

Die Untersuchungen wurden am liegenden oder sitzenden Probanden nach einer Ruhepause von 5 - 10 Minuten durchgeführt. Die Raumtemperatur betrug dabei $21 - 23^{\circ} \text{C}$, die Luftfeuchtigkeit zwischen 55 und 65 %. Die verwendete Thermoelektrode ermöglichte die gleichzeitige Messung der Temperatur- und Muskelaktivität. Es handelt sich um eine konzentrische Myographielektrode mit einem in die Spitze der Nadel eingebauten Thermoelement (Typ 13 L 10).

Die Platinoberfläche beträgt $0,07 \text{ mm}^2$, der Nadeldurchmesser 0,6 mm, die Nadellänge 36 mm (Abb. 2).

Über ein biologisches Temperaturmeßgerät (Typ 14 G 05) läßt sich die Temperatur am Zeigerinstrument und zusätzlich an einem Digital-Voltmeter ablesen. Gleichzeitig ermöglicht ein Myograph die *s i m u l t a n e* Registrierung der Muskelaktivität am Bildschirm bzw. mittels einer Kameraausrüstung auf Photopapier (Abb. 3). Die technischen Daten wurden von LAHODA mitgeteilt (12).



Concentric needle electrode with temperature sensor 13 L 10
DISA Electronic A/S Herlev / Denmark

Abb. 2 Schnittzeichnung der Thermoelektrode

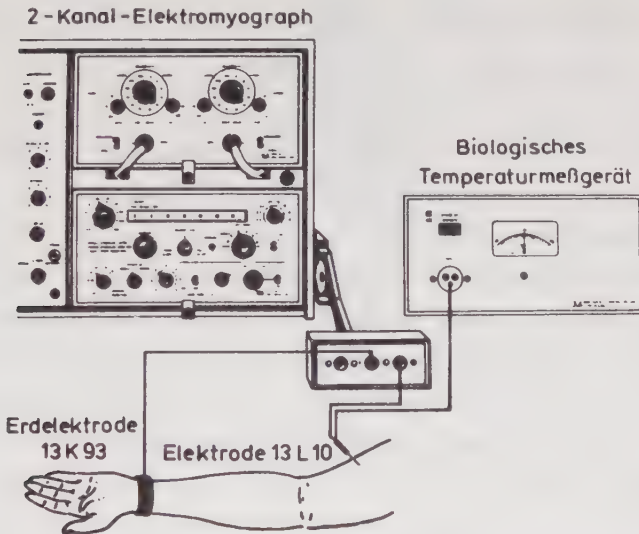


Abb. 3 Versuchsanordnung der simultanen Registrierung von Muskelaktionspotentialen und Temperatur über biologisches Temperaturmeßgerät und DISA - Zweikanal-Myograph

Zur Dokumentation wurde zusätzlich ein mechanischer Direktschreiber in Verbindung mit dem biologischen Temperaturmeßgerät verwendet. Die Zeitmarkierung in Abszissenrichtung betrug 6 sec. pro

Teilstrich, die Temperatureichung in Ordinatenrichtung $0,02^{\circ}\text{C}$ pro Teilstrich. Extinktions- bzw. Transmissionswerte haben für die Messungen keine Bedeutung, da zwischen den einzelnen Kontraktionen bei Ausnutzung der vollen Schreibbreite ($1^{\circ}\text{C} / 100$ Teilstriche) jeweils neu auf die Nulllinie eingestellt wurde.

2. 1. 3. Untersuchte Muskeln

Vorzugsweise untersucht wurden die *Mm. interosseus dorsalis I*, *extensor digitorum brevis* und *tibialis anterior*, welche wegen ihrem relativ konstanten Verhalten, bedingt durch den Muskelaufbau und die topographische Funktionslage besonders gut geeignet waren; außerdem die *Mm. deltoideus*, *biceps brachii* und *quadriceps femoris*.

2. 1. 4. Versuchsablauf

Beim Einstich der Elektrode, jeweils in das Zentrum des Muskelbauchs, wurde durch exakte Stichrichtung und Stichtiefe besonders darauf geachtet, den traumatischen Defekt im Muskelgewebe möglichst gering zu halten. Zunächst wurde in Ruhe, dann bei maximaler isometrischer Willkürkontraktion gegen Widerstand über eine durchschnittliche Zeit von 25 sec und schließlich nach Beendigung des Kontraktionsvorgangs gemessen, wobei die Nadellage unverändert blieb. Außerdem wurden Kontraktionsserien von bis zu 6 Einzelkontraktionen mit dazwischenliegenden Erholungspausen von ca. 120 sec durchgeführt. Durch die *s i m u l t a n e* Registrierung des Elektromyogramms war es nicht nur möglich etwaige myogene und neurogene Störungen aufzudecken, sondern auch zusätzlich den Grad der Willkürinnervation zu kontrollieren und zu beurteilen.

Bei 10 Versuchspersonen wurde noch der Temperaturverlauf im venösen Blut, einer aus dem Bereich des *m. interosseus dors. I* abführenden, oberflächlichen Vene nach deren Punktion oberhalb der *foveola radialis* gemessen.

2. 2. Ergebnisse

2. 2. 1. Einzelkontraktionen

Die vor der ersten Kontraktion für die einzelnen Muskeln bestimmten Ruhetemperaturen brachten zu erwartende Ergebnisse. Die proximalen und relativ großvolumigen Muskeln mit enger Beziehung zum Körperkern wiesen ein höheres Temperaturniveau auf als die distalen, kleinvolumigen Muskeln, die in den Bereich der Körperschale entfallen (Abb. 4) (Tabelle 1).

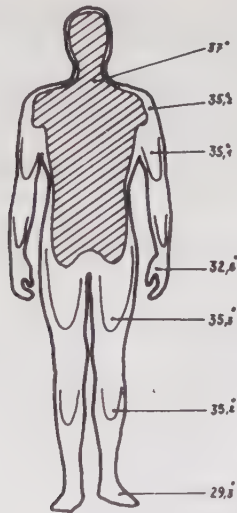


Abb. 4 Isothermen in der Körperschale bei 23° C Raumtemperatur (schraffiert das "homoiotherme" Kerngebiet) und gemessene Ruhetemperaturen der untersuchten Muskeln. (Modifiziert nach ASCHOFF J. (1))

Die Temperaturverlaufskurven während der Muskelkontraktion und bei der Erschlaffung zeigen ein, dieser groben, räumlichen Unterscheidung entsprechendes Verhalten.

2. 2. 1. 1. Proximale Muskeln

Bei der Ableitung aus großvolumigen Muskeln (z. B. *Mm. quadriceps femoris*, *tibialis anterior*) ist mit einsetzender Willkürkontraktion ein steiler, deutlicher Temperaturabfall bis zu $0,6^{\circ}\text{C}$ unter das Ausgangsniveau zu beobachten, der über die weitere Kontraktionszeit persistiert oder gegen Ende leicht abnimmt, ohne jedoch die Ruhetemperatur nur annähernd wieder zu erreichen (Abb. 6a und 6b).

2. 2. 1. 2. Distale Muskeln

Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse, die an den kleinen Muskeln gewonnen wurden (*Mm. interosseus dors I*, *extensor dig. brevis*). Mit Beginn der Kontraktion steigt hier die Temperatur mehr oder weniger steil an, um dann gegen deren Ende ihr Maximum zu erreichen, das bis zu $0,5^{\circ}\text{C}$ über der Ausgangstemperatur liegt (Abb. 6k und 6l).

Mit Ende der Willkürinnervation und dem Beginn der Erschlaffungs- und anschließenden Erholungsphase steigt die Temperatur in den proximalen Muskeln sofort wieder steil bis zum und über das Ausgangsniveau hinaus an und kontinuierlich weiter, bis auf ein sich neu ausbildendes höheres Temperaturplateau (Abb. 7), während der Temperaturverlauf der distalen, kleinen Hand- und Fußmuskeln zuerst einen kurzen Temperaturabfall beschreibt, um erst daran anschließend endgültig weiter anzusteigen (Abb. 8a und 8b).

2. 2. 1. 3. Mischtypen

Neben diesen eben beschriebenen, sich annähernd reziprok verhaltenden, extremen Verlaufsformen fällt noch eine weitere charakteristische Gruppe auf, die in ihrer Häufigkeitsverteilung jedoch nicht an eine bestimmte Muskelgruppe gebunden scheint. Sie ist gekennzeichnet durch einen kurzzeitigen, deutlichen Temperaturab-

fall mit Beginn der Kontraktion, der jedoch schon in deren weiterem Verlauf in einen unterschiedlich starken Temperaturanstieg übergeht, um mit dem Kontraktionsende die Ausgangswerte wieder erreicht zu haben (Abb. 6e). Beim Versuch die restlichen Ergebnisse diesem Formenschema zuzuordnen, läßt sich eine Beziehung zwischen dem beschriebenen mittleren Verlaufstyp und den beiden häufigen Extremformen erkennen. Letztlich werden diese Zwischenformen nach den jeweils überwiegenden Verlaufscharakteristiken bezeichnet (Abb. 6c und 6 g).

2. 2. 2. Zusammenstellung der Verlaufsformen

Aus den angeführten Beobachtungen über das thermodynamische Verhalten verschiedener Muskeln läßt sich eine Einteilung in charakteristische Typen vornehmen.

Die Temperaturverlaufsformen A und B bis C und deren Übergänge sind aus den Abbildungen 6a - 6 l ersichtlich.

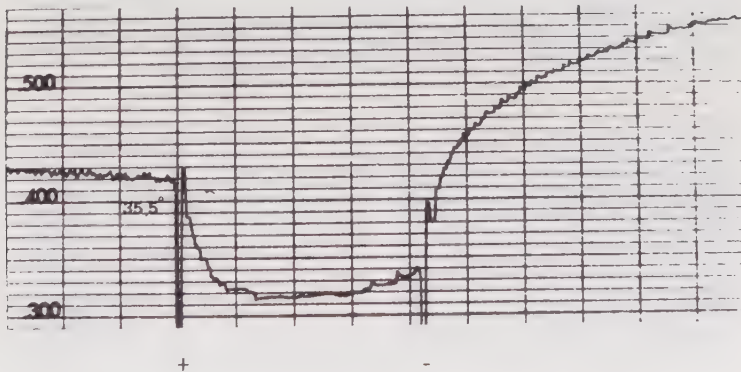


Abb. 6a m. tibialis anterior

Kontraktion: + = Beginn
- = Ende

Temperatur-
verlaufsform

A

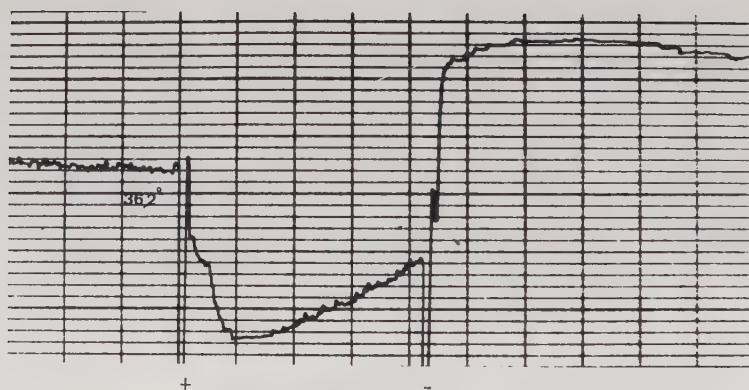


Abb. 6b
m. tibialis anterior

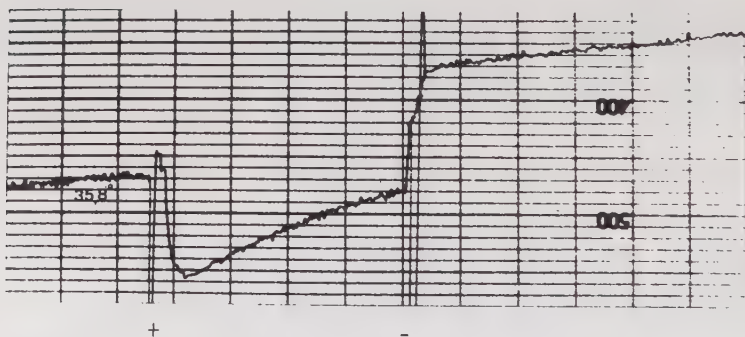


Abb. 6c
m. tibialis anterior

A / B

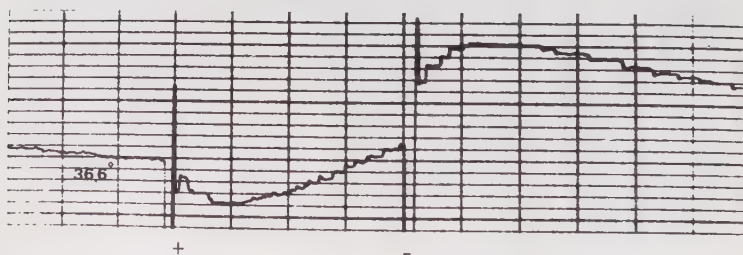


Abb. 6d
m. quadriceps femoris

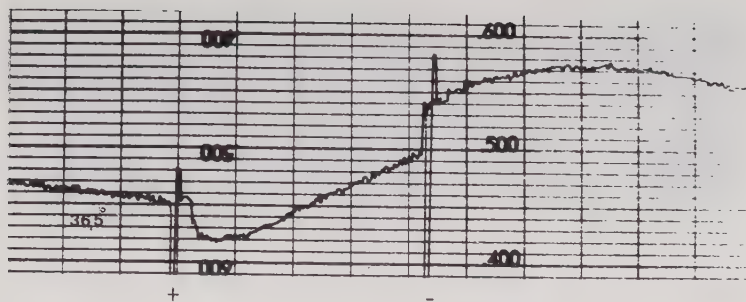


Abb. 6e m. biceps brachii

B

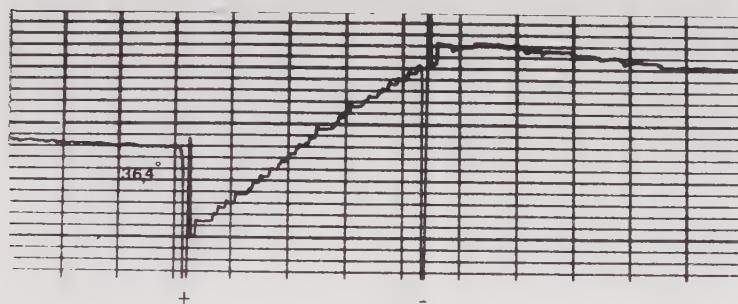


Abb. 6f m. deltoideus

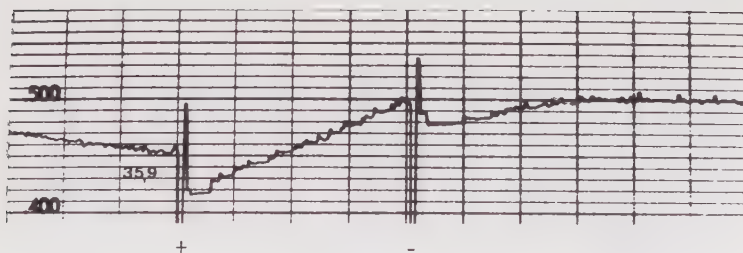


Abb. 6g m. tibialis anterior

B / C

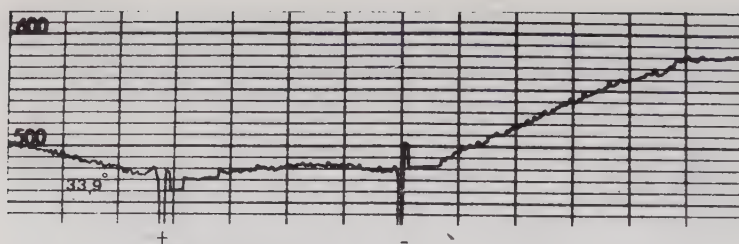


Abb. 6h
m. deltoideus

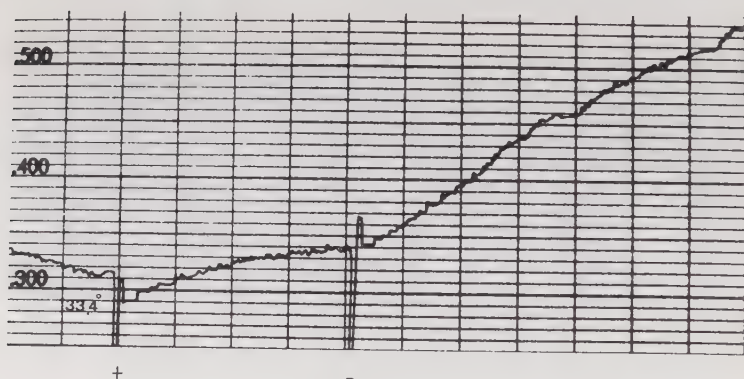


Abb. 6i
m. interosseus dors. I

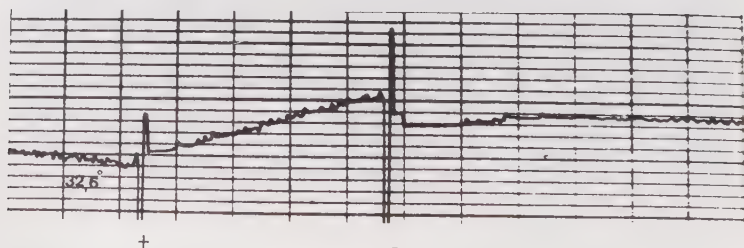


Abb. 6j
m. extensor dig. brevis

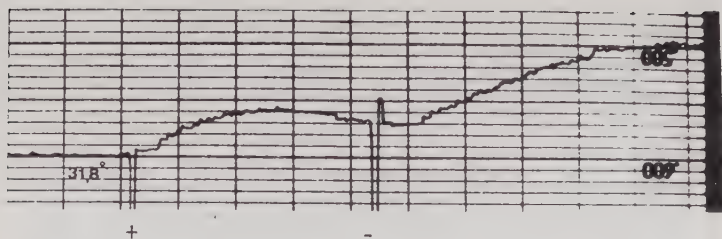


Abb. 6k m. interosseus dors. I

C

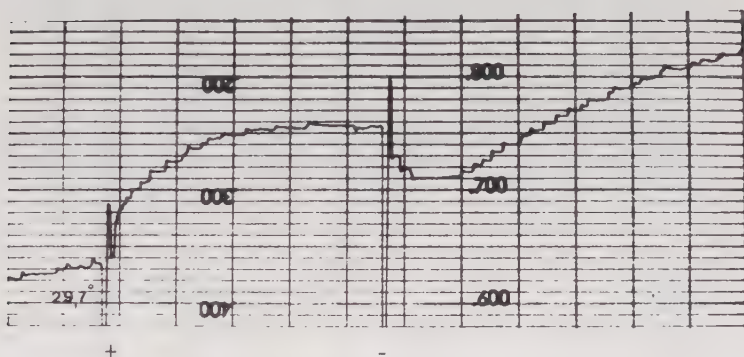


Abb. 6 l m. interosseus dors. I

Tabelle 1: Zuordnung von Einzelregistrierungen in Bezug auf Muskelzugehörigkeit, Temperatur und Verlaufsform

Muskel	Verlaufsform					GESAMT	Ausgangs- temperatur	Standard s $\bar{x}$
	A	A/B	B	B/C	C			
m. extensor dig. brevis	3	2	--	3	12	20	29, 3	0, 36
m. interosseus dors. I	1	--	9	2	16	28	32, 8	0, 36
m. biceps brachii	--	--	4	--	--	4	35, 1	0, 35
m. deltoideus	--	1	3	3	3	10	35, 2	0, 37
m. quadriceps femoris	2	1	4	1	--	8	35, 3	0, 31
m. tibialis anterior	14	7	3	3	2	29	35, 4	0, 13
GESAMT	20	11	23	12	33	99		
Ausgangs- temperatur	34, 5	34, 3	34, 4	33, 3	31, 7			
Standard s $\bar{x}$	0, 43	0, 69	0, 28	1, 00	0, 49			

Charakteristische Temperaturverläufe nach Kontraktionsende

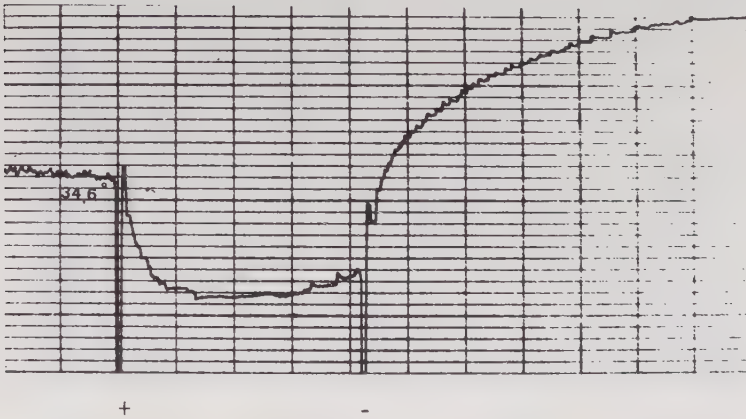


Abb. 7 m. tibialis anterior

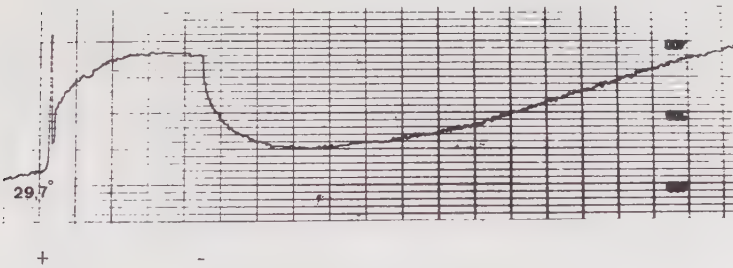


Abb. 8a m. extensor dig. brevis

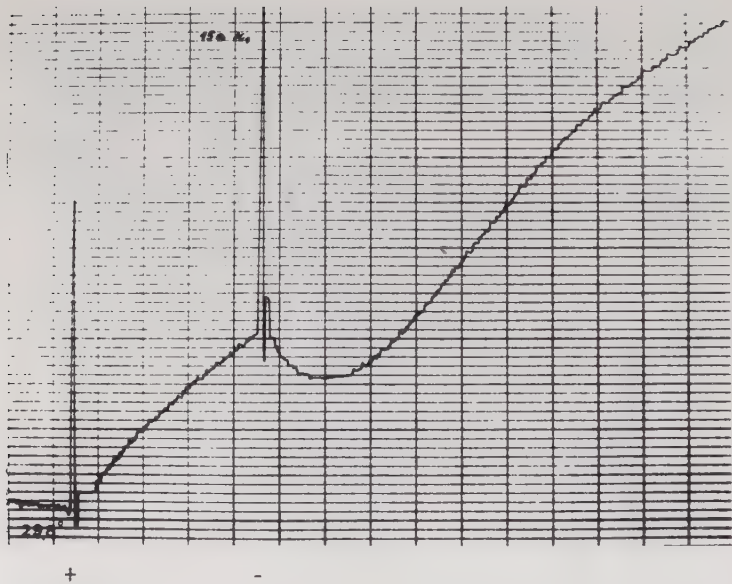


Abb. 8 b m. interosseus dors. I

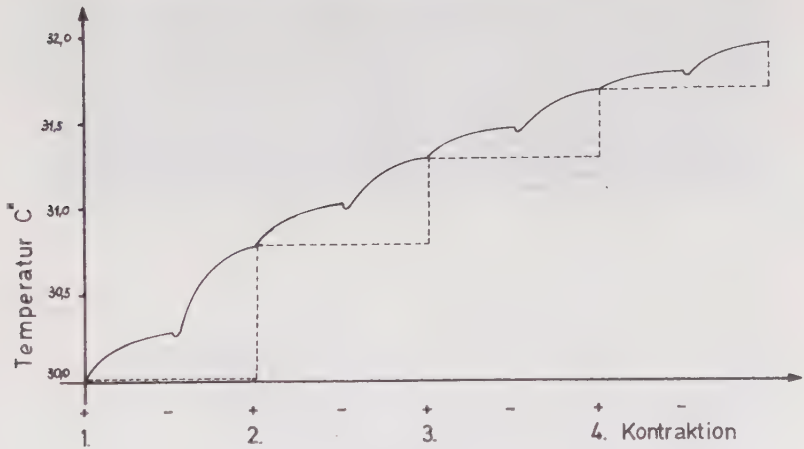
2. 2. 3. Kontraktionsserien

Bei der Durchsicht der Resultate aus den Kontraktionsserien ergibt sich bei allen untersuchten Muskeln ein treppenförmiger Temperaturanstieg von einer Kontraktion zur anderen (Schema 1). Die gemessenen Intervallwerte werden proportional mit der Zahl der Einzelkontraktionen pro Serie kleiner. Sind die errechneten Durchschnittswerte aus allen Serien bei den kleinen Muskeln annähernd gleich, so liegt die Temperatursteigerung beim m. tibialis anterior um 50 % niedriger (Tabelle 2) .

Tabelle 2: Zusammenstellung der Meßwerte aus den Kontraktionsserien

Muskel	Serien	Einzel- kontr.	Ausgangs- temp. °C	End- temp. °C	Temp. Steig. pro Kontr. °C
m. interosseus dors. I	9	46	32,3	34,6	0,57
m. extensor dig. brevis	9	32	29,9	31,4	0,51
m. tibialis anterior	12	47	35,6	36,2	0,24

Schema 1: Phasen des Temperaturanstiegs während einer Kontraktionsserie des m. extensor dig. brevis



Eine Besonderheit fällt bei einigen Kontraktionsserien der Mm. interosseus dors. I und extensor dig. brevis auf. Es zeigt sich, daß dort in Fällen besonders ausgeprägter Temperatursteigerungen im Rahmen der Erholungszeit zwischen den einzelnen Kontraktionen, der bei Beginn der Serie sich ursprünglich eingestellte Verlaufstyp ändert. Dieser Muskelgruppe entsprechend vollzieht sich die Umkehr von Typ C nach der Zwischenform A/B (Abb. 10a und 10 b) und sogar nach dem reziproken Typ A (Abb. 9a und 9 b).

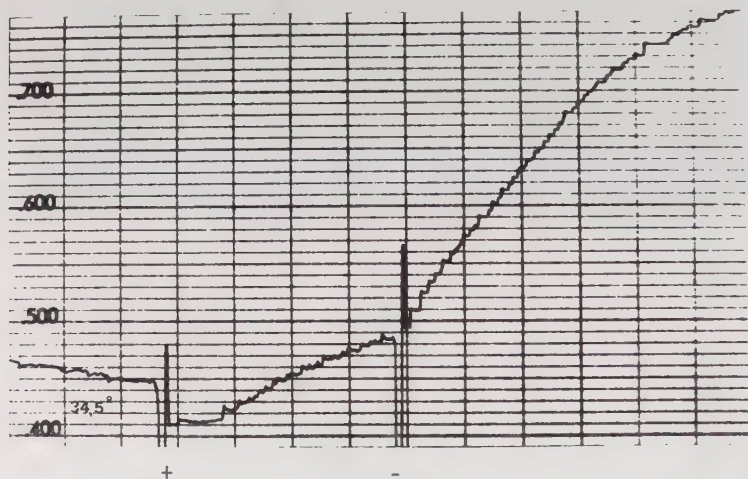


Abb. 9a m. interosseus dors. I
2. Kontraktion Verlaufsform B/C

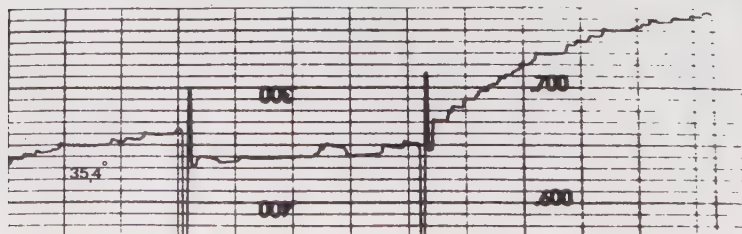


Abb. 9b m. interosseus dors. I
4. Kontraktion Verlaufsform A

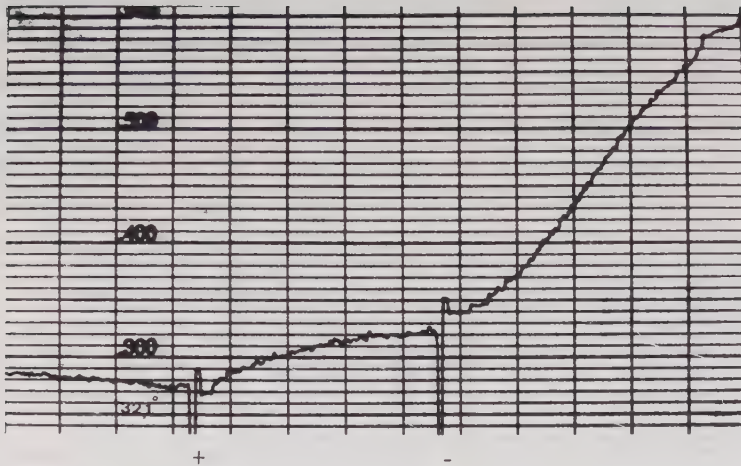


Abb. 10a m. extensor dig. brevis
3. Kontraktion Verlaufsform C

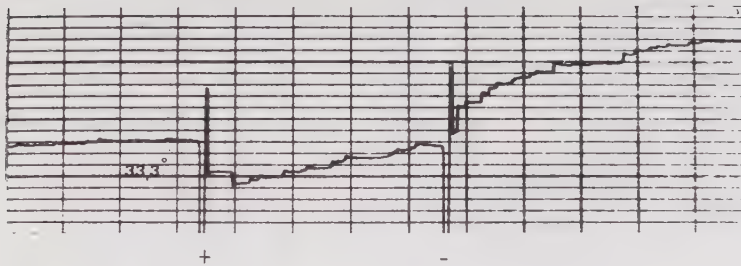


Abb. 10b m. extensor dig. brevis
5. Kontraktion Verlaufsform A/B

2. 2. 4. Venentemperaturmessungen

Am Rande seien noch die Ergebnisse der Venenbluttemperaturmessungen aus dem Gebiet des m. interosseus dors. I erwähnt. In den meisten Fällen sinkt die Temperaturkurve während der Kontraktion mehr oder weniger stark, um dann mit Ende der Kontraktion häufig einen kurzen, steilen Temperaturanstieg zu zeigen. Vergleicht man diese Meßkurven mit dem Temperaturverlauf im entsprechenden

Muskel, so fällt der Temperaturanstieg zeitlich und größenordnungsmäßig in etwa mit dem dort beobachteten Temperaturabfall nach Kontraktionsende zusammen (Abb. 11 a und 11 b). Dieses Verhalten ist aber nicht sicher zu reproduzieren, was von den Schwierigkeiten bei der exakten Fixierung der Thermosonde im Gefäßlumen herrührt.

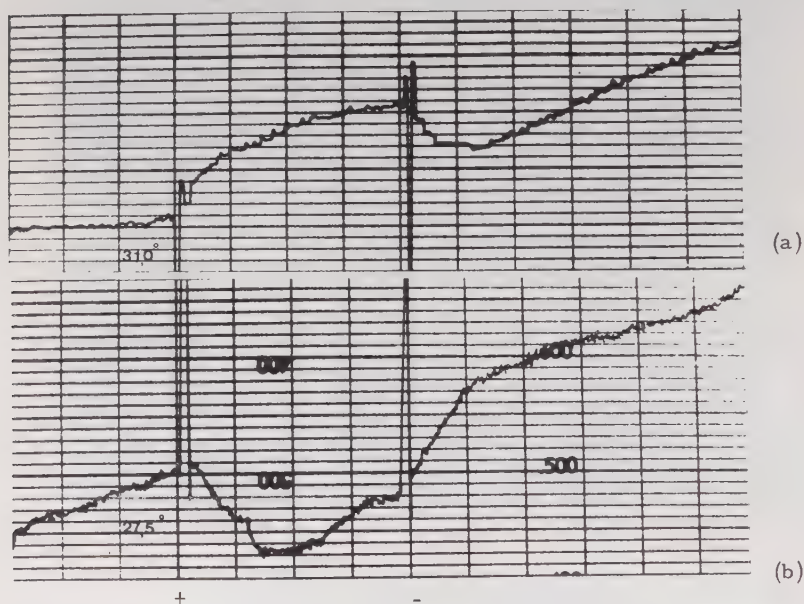


Abb. 11 Temperaturverläufe während der Muskelkontraktionen

(a) im m. interosseus dors. I

(b) in der abführenden Hautvene

2. 3. Diskussion

Die hier angewandte Methode der Muskeltemperaturmessung im menschlichen Skelettmuskel in vivo kann verständlicherweise allein keine endgültige Analyse der thermodynamischen Vorgänge darstellen. Sie ist vielmehr als Versuch zu sehen, die vielfältigen Einflüsse auf das Geschehen im Muskelgewebe während der Kontraktion abzugrenzen und zu interpretieren.

Die Wärmebildung bei der isometrischen Kontraktion ist außergewöhnlich komplex. Sie ist im Anstieg immer kleiner als unter isotonischen Verhältnissen, weil die Verkürzungswärme viel geringer ist. Die verbleibende Wärmebildung beruht auf der noch vorhandenen Verkürzung der kontraktilen Elemente, der sog. inneren Kontraktion (10).

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigen diese seit langem bekannten Vorgänge, ebenso aber zum Teil, die von LAHODA in seinen Voruntersuchungen gewonnenen Ergebnisse der Temperaturenniedrigung während der Kontraktion.

2. 3. 1. Kontraktionswärme und Muskeldurchblutung

Die Ursache der zwei, grob gesehen sich entgegengesetzt verhaltenden Temperaturverläufe in den Muskeln ein und derselben Versuchsperson, ist mit größter Wahrscheinlichkeit nicht auf für verschiedene Muskelgruppen verschiedene Grundmechanismen zurückzuführen. Bei der Suche nach einer Erklärung dieses Phänomens liegt es nahe, sich auf den Einfluß der mechanischen Behinderung der Durchblutung der Skelettmuskulatur in Abhängigkeit von der Muskelspannung während der Kontraktion zu beziehen (3). Das umso mehr, als bekanntlich die Temperatur des strömenden arteriellen Blutes in der Regel mehr oder weniger über der des Muskelgewebes liegt und somit einen bedeutenden Einfluß in Beziehung auf das Temperaturverhalten dar-

stellen dürfte.

Somit bieten sich zur Interpretation der Vorgänge bei der Kontraktion, als auch bei der anschließenden Erschlaffung, zwei sich überlagernde Mechanismen an. Während des Kontraktionsvorganges wird Kontraktionswärme gebildet, was zu einer Temperaturerhöhung führt. Dem gegenüber übt die Unterbrechung des Muskelkreislaufs während der Dauer der isometrischen Kontraktion eher einen temperaturerniedrigenden Einfluß aus. Bei der Muskeler Schlaffung wiederum führt nun die verstärkt einsetzende Wiederdurchblutung ebenso zu einer Temperatursteigerung wie die Verlustwärme, d. h. aus der an den elastischen Komponenten geleisteten Arbeit und die thermoelastische Wärme in Folge des Spannungsabfalls (11).

Welche Voraussetzungen einen der beiden, voneinander unabhängigen Faktoren, durch sein relatives Übergewicht während des Kontraktionsvorgangs, das jeweilige Grundverhalten des Temperaturverlaufs bestimmen lassen, bleibt im Folgenden näher zu betrachten.

2. 3. 2. Temperaturfelder des menschlichen Körpers

Die komplizierten räumlichen Temperaturfelder des menschlichen Körpers lassen es zweckmäßig erscheinen, einen homoiothermen Körperkern von einer mehr oder weniger poikilothermen Körperschale zu unterscheiden (Abb. 4). Diese Temperaturfelder dürfen jedoch nicht als starre Größen aufgefaßt werden. Je nach den herrschenden Bedingungen unterliegt die Steilheit des Temperaturgefälles innerhalb des Körpers großen Schwankungen. Ein sinnfälliger Ausdruck hierfür ist das Wandern der Isothermen mit wechselnder Durchblutung (1). Diese stellt den bedeutendsten Teil aller Wärmetransportmechanismen dar. Die Skelettmuskulatur besitzt in Übereinstimmung mit ihrem intensiven Stoffwechsel eine sehr gute Blutversorgung. Die dünnen Kapillaren bilden ein längsgestrecktes Maschen-

werk mit rechtwinkligen Anastomosen und sind so zahlreich, daß jedem Muskelfaserquerschnitt mehr als eine anliegt (12).

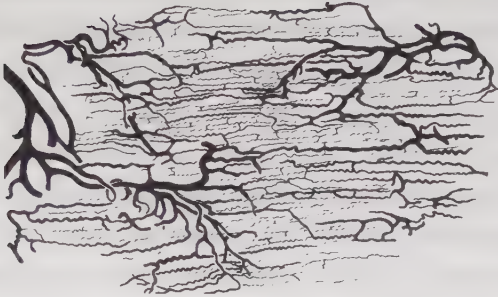


Abb. 12 Blutversorgung eines menschlichen Skelettmuskels.
Darstellung der Blutgefäße durch Injektion mit Karmin-
Gelatine. Vergr. 60mal (E).

Die im Körper und der Muskulatur gebildete Wärme wird vorwiegend konvektiv mit dem arteriellen Blutstrom in die Peripherie transportiert, während die konduktive Wärmeleitung durch das Gewebe vergleichsweise gering ist, was aus den unterschiedlichen Wärmeleitahlen für das Muskelgewebe und das Blut ersichtlich ist. Der konvektive Wärmetransport setzt Oberflächen voraus, an denen die Wärme vom Blut an das Gewebe und umgekehrt übertritt; hierfür ist das Kapillargebiet in Abhängigkeit von der Durchblutung maßgeblich. Der Wärmestrom von der Haut an die Umgebung erfolgt auf drei Wegen: durch Strahlung, durch Leitung und Konvektion und durch Verdunstung.

2. 3. 3. Muskelkontraktion und Erschlaffung

An der Steuerung des inneren Wärmestroms mit Hilfe des Kreislaufs sind nicht alle Gebiete in gleicher Weise beteiligt. Die kernnahen Areale besitzen nur geringe Möglichkeiten das Temperaturge-

fälle zwischen Körperkern, Muskulatur und Oberfläche zu kompensieren. In diesen Bereich entfallen die großvolumigen Muskeln, in die das arterielle Blut fast mit Kerntemperatur einströmt. Es besteht somit ein beachtliches Temperaturgefälle vom Blut zum Muskelgewebe, ebenso wie vom Zentrum des Muskelbauchs in die Randbezirke und zur Haut. Das Gesagte macht deutlich, daß sich hier der Einfluß der mit dem Blut zugeführten Wärme auf die gemessene Muskeltemperatur besonders deutlich auswirken wird.

Dies spiegelt sich im Temperaturkurvenverlauf wider (Abb. 6a und 6b). Der plötzliche, starke Temperaturabfall bei der Verlaufsform A, mit Beginn der Kontraktion, wäre dann Ausdruck der Gefäßkompression, was sowohl zu einem Auspressen des Muskelbluts führt, als auch eine Unterbrechung des Blutzustroms bedeutet. In kürzester Zeit stellt sich annähernd ein Gleichgewicht zwischen diesem temperaturerniedrigenden Faktor und der gleichzeitig sich aufaddierenden Kontraktionswärme ein und läßt so den Temperaturverlauf sistieren oder leicht ansteigen.

Im Gegensatz dazu stehen die Verhältnisse in den Extremitäten, die in ihren distalen Abschnitten uneingeschränkt zur Körperschale zu rechnen sind. Da sie bei kleinem Durchmesser relativ große Oberflächen haben, sind sie hervorragend geeignet durch ihre variable Durchblutung die Wärmeabgabe bei kleinem inneren Temperaturgefälle weit zu fördern. Der Regulationsmechanismus wird in den Extremitäten durch einen weiteren Umstand besonders wirksam. Die arteriellen und venösen Strombahnen, die hier auf langer Strecke einander parallel laufen, tauschen unter Umständen beträchtliche Wärmemengen aus (4). Da Wärme vorwiegend am distalen Ende der Extremitäten an die Umgebung übertritt, ist das rückströmende, venöse Blut beträchtlich kälter als das arterielle. So bildet sich zu-

sätzlich zum axialen ein transversales Temperaturgefälle aus, über das Wärme strömt, ohne die Peripherie zu erreichen. Dieser "Kurzschluß" ist desto wirksamer, je langsamer das Blut strömt, was gerade während der Kontraktion der Fall ist. Das arterielle, in den Muskel einströmende Blut kühlt also auf seinem Weg durch den Arm bzw. das Bein beträchtlich ab (1). Folglich ist das Temperaturgefälle vom Blut zum Muskelgewebe sehr gering. Somit wird der Einfluß des zuströmenden Blutes, bzw. der Effekt des Auspressens von untergeordneter Bedeutung sein, hingegen die gebildete Kontraktionswärme überwiegen und den Temperaturverlauf von Typ C charakterisieren, was sich in einem mehr oder weniger ausgeprägten Kurvenanstieg während der Kontraktion zeigt (Abb. 6 k und 6 l).

Je nach dem Grad der Funktionslage der untersuchten Muskeln, ihrer individuellen Kapillardichte und nicht zuletzt ihres Trainingszustandes können nun verschiedene Variationsmöglichkeiten diskutiert werden. Unter diesen Gesichtspunkten wären die Temperaturkurven zu interpretieren, die zwischen den beiden besprochenen Extremformen A und C liegen. Es liegt der folgende Schluß nahe: Je stärker die Bedeutung des Durchblutungsgrades für die gemessene Muskeltemperatur ist, umso größer ist die Tendenz zu den Zwischenformen vom Typ A/B (Abb. 6 c und 6 d). Umgekehrt würde es sich dann bei Typ B/C verhalten, wo noch während der Kontraktion die Kontraktionswärme zu dominieren beginnt (Abb. 6 g und 6 h). Betrachtet man die Verhältnisse bei der Mittelform nach Typ B, so folgt hier dem bei Kontraktionsbeginn eingetretenen Temperaturabfall rasch ein Ausgleich beider Stellgrößen und alsbald ein Temperaturanstieg, der von der sich verstärkt bemerkbar machenden Kontraktionswärme herrührt, sodaß bei Kontraktionsende die Ausgangstemperatur wieder erreicht oder leicht überschritten wird (Abb. 6 e).

2. 2. 4. Kontraktionsserien

Baut man nun auf diese Erklärungsversuche auf, so wäre auch eine Deutung des bei Kontraktionsserien der distalen Hand- und Fußmuskulatur beobachteten Wechsels der Verlaufsformen innerhalb ein und derselben Serie möglich. Auffallend ist, daß die Verlaufsänderungen von Typ C bzw. B/C auf Typ A/B (Abb. 10 a und 10 b) und sogar nach Typ A (Abb. 9 a und 9 b) besonders bei Serien mit relativ hohen Ruheausgangstemperaturen und überdurchschnittlichen Temperatursteigerungsraten zwischen den Einzelkontraktionen auftraten. Man könnte deshalb den entsprechend höheren Grad der funktionellen Muskel - Kreislaufreserve aus der reaktiven Hyperämie heraus dafür verantwortlich machen. Das würde bedeuten, daß dadurch selbst in den distalen Extremitätenbezirken durch den gesteigerten Blutdurchfluß das Temperaturgefälle vom Blut zum Gewebe größer wird. Unter solchen Bedingungen wären diese Teile der Körperschale dann "konvektiv" überbrückt, was schließlich dazu führt, daß sich diese Muskeln wie proximale Muskelgruppen verhalten, was mit einer Änderung des für sie typischen Verhaltens einhergeht.

2. 3. 5. Erholungsphasen

Wesentlich einfacher erscheint die Interpretation der Kurvenverläufe nach der Muskelkontraktion, also während der Erschlaffungs- und Erholungsphase. Wie schon erwähnt, wird die bei der isometrischen Kontraktion entstehende Energie danach als Verlustwärme bzw. thermoelastische Wärme frei. In die gleiche Richtung geht der temperatursteigernde Einfluß der verstärkt einsetzenden Wiederdurchblutung in Form der reaktiven Arbeitshyperämie. Sie erfüllt nicht nur nutritive Aufgaben, sondern bewerkstelligt verständlicherweise auch die lokale Temperatureinstellung, unterstützt von der Tatsache, daß benachbarte Muskel- und Hautbezirke oft von derselben Arterie versorgt

werden.

In allen untersuchten Muskeln wurde nach Kontraktionsende ein mehr oder weniger deutlicher, jedoch zeitlich nicht einheitlicher Temperaturanstieg beobachtet.

Der sich sofort und kontinuierlich entwickelnde Anstieg bei den proximalen Muskeln ist sicher in Korrelation zu den dort vorherrschenden, schon beschriebenen Durchblutungsverhältnissen zu sehen (Abb. 7). Der bei den distalen Muskeln auffallende, verschieden starke Temperaturabfall von unterschiedlicher zeitlicher Dauer scheint ebenso thermodynamisch bedingt. Ursächlich dürfte das plötzliche Einströmen der in den Extremitäten gestauten und vorgekühlten arteriellen Blutsäule wirksam sein. So erscheint der Effekt der Hyperämie hier verzögert (Abb. 8a und 8 b).

2. 3. 6. Venentemperaturmessungen

Die bei der Venenpunktion gewonnenen Meßkurven können in ähnlicher Weise diskutiert werden. Es bietet sich an, die bemerkte Beziehung zu den Kurvenverläufen angrenzender Muskeln auf die Ausschwemmung von muskulärem Restblut zurückzuführen, das während des kontraktionsbedingten Strömungsstillstandes im kontrahierten Muskel durch die Kontraktionswärme aufgeheizt wurde und bei Wiedereinsetzender Zirkulation abtransportiert wird (Abb. 11a und 11 b).

2. 3. 7. Ausblick

Die mit der hier beschriebenen Methode durchgeführten Messungen und der Versuch einer Erklärung des Beobachteten bedürfen einer weitergehenden Abklärung. Es müssen die im einzelnen vermuteten und diskutierten, ursächlichen Grundmechanismen auf ihre Richtigkeiten hin näher untersucht werden. Erst wenn die verschiedenen Bedingungen, die das Temperaturverhalten beeinflussen, besser ab-

gegrenzt werden können, sind Rückschlüsse auf den funktionellen Durchblutungsgrad oder auf pathologische Veränderungen in der Muskulatur möglich und sinnvoll.

Der Vorteil der hier angewandten Methode liegt zweifellos in der relativ einfachen Handhabung und der *s i m u l t a n e n* Durchführung im Rahmen der routinemäßigen, klinischen Elektromyographie, ohne zusätzliche Belastung für die zu untersuchenden Patienten. Jedoch erst wenn die angeführten Punkte zufriedenstellend abgeklärt sind, läßt sich der durchaus denkbare diagnostische und prognostische Wert richtig einschätzen.

3. ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe einer speziellen Thermoelektrode, die die *s i m u l t a n e* Registrierung von EMG und Temperatur ermöglicht, wurden verschiedene proximale und distale Skelettmuskeln jüngerer, gesunder Versuchspersonen vor, während und nach der isometrischen Willkürkontraktion *in vivo* untersucht.

Es zeigten sich für verschiedene Muskelgruppen unterschiedliche, jedoch typische Temperaturverlaufsformen. So stehen sich die mehr proximalen, großvolumigen Muskeln und die distalen, kleineren Muskeln annähernd reziprok gegenüber.

Der Einfluß der kontraktionsbedingten Gefäßkompression als temperatursenkender Faktor einerseits und die gebildete Kontraktionswärme als temperatursteigernder Faktor andererseits scheinen je nach ihrem Übergewicht das spezifische Temperaturverhalten hervorzurufen.

Entscheidend hierfür ist wohl die Höhe des Temperaturgefälles vom arteriell einströmenden Blut zur Ableitstelle im Muskelgewebe. Ein großes Gefälle wie im *m. tibialis anterior* ruft einen deutlichen Temperaturabfall hervor, während umgekehrt das kleine Temperaturgefälle im *m. interosseus dors.* I zu einem beachtlichen Anstieg der Temperaturkurve führt. Der klinische Wert der beobachteten Untersuchungsergebnisse muß durch weitere differenzierende Untersuchungen abgeklärt werden.

Mein Dank gilt
Priv. - Doz. Dr. F. Láhoda und
Prof. Dr. A. Schrader
für Ihre wertvollen Ratschläge und
die freundliche Unterstützung.

LEBENS LAUF

Axel B a u m a n n
geboren, 2. 11. 1948 in Hammerau

1955 - 1959	Volksschulbildung
1959 - 1968	Math. - nat. Gymnasium in Bad Reichenhall
23. 7. 1968	Reifeprüfung
1968 - 1970	Wehrdienst Studium der Humanmedizin
1970 - 1973	an der Universität Marburg
1973 - 1976	an der Universität München
16. 6. 1976	Staatsexamen

